基于生态网络分析的新疆“水-能-碳”耦合系统特征研究

王志强， 姜文桓， 卢诗月
（新疆农业大学公共管理学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：水资源、能源、碳排放是扰动经济社会-生态复合系统的重要因素，单要素变化会产生联动效应，传递生态压力，影响区域和产业的持续发展。以新疆为研究对象，基于2007、2012、2017年新疆投入产出表，运用环境投入产出和生态网络分析模型呈现“水-能-碳”网络系统耦合特征。结果表明：(1) 混合水主要用于国内省外流出和居民消费，混合能、混合碳主要用于国内省外流出和资本形成总额。(2) 水类网络循环率小于42%，能类网络和碳类网络循环率小于25%，网络系统整体表现出下降趋势。(3) 水类网络、能类网络、碳类网络系统鲁棒性向发展停滞一侧倾斜，整体展现出不可持续发展的状态。(4) 新疆“水-能-碳”耦合系统各部门间的水系统、能系统、碳系统关联性不强，控制与依赖关系尚处于偶发状态，产业间“水-能-碳”未能形成协同关系。厘清新疆“水-能-碳”耦合系统规律，为实现低碳高效资源综合管理模式提供实证支撑。

关 键 词：生态网络分析；环境投入产出；“水-能-碳”耦合；新疆
文章编号：1000－6060(2023)12－2005－12(2005～2016)

随着碳达峰碳中和目标提出，“双碳”目标已成为习近平生态文明思想的重要组成部分，必将引起国家资源利用的系统性变革[1]。水资源、能源、碳排放是影响经济发展的重要要素，彼此间相互依存、相互制约，单一要素的变化会引起其他要素的联动变化[2]。一方面，能源为水资源的取用以及废水处理提供动力[3]；另一方面，水资源为能源的开采、加工、运输等各环节提供基础原料[4]，水、能的需求规模、组合方式及消耗强度不同，导致碳排放量具有差异性[5]。然而，现实资源利用管理过程中，水资源、能源、碳排放隶属于不同的管理部门，产业部门往往拘泥于自身发展需求中，以致资源利用过程中“水-能-碳”系统难以实现正面效应的叠加和负面效应的拮抗。探究如何从多要素资源耦合视角推动区域资源高效利用和碳减排，是新时代区域可持续发展亟待解决的问题。

国内外学者对于水资源、能源和碳排放的研究，主要偏重于水能资源耦合[6-8]、能源消费与碳排放关系[9-13]、内陆水体碳排放量[14-15]等两要素的耦合研究，对于三要素的研究处于起步发展阶段，更多聚焦于典型行业的“水-能-碳”耦合[16-17]分析。随着高质量发展战略的提出，城市资源消耗低碳管理[18]、资源环境与经济增长协同增效[19]、城市产业“能-水-碳”耦合分析[20]引起关注。对“水-能-碳”耦合关系的研究方法可归纳为两类：一是生命周期评价法[21]和物质流分析法[22]，对研究对象的全生命周期进行评价，虽然保证了量化的准确性，但需要大量数据的支持，属于“自下而上”的方法。后期引入生态网络分析法，从整体上辨识系统内在属性的方法[23]。二是投入产出法，通过建立产品供需方程，从而预测经济发展前景，研究区域逐步从单区域投入产出法向多区域投入产出法扩充，从静态投入产出向环境投入产出递增[24]，属于“自上而下”的方法。

综上所述，目前学者对资源要素耦合的研究领域不断扩展，研究方法不断呈现多元化的发展，但

收稿日期：2023-05-05； **修订日期**：2023-06-01
基金项目：国家自然科学资金项目(72164035)；新疆维吾尔自治区社科基金项目(21BGL115)；新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A85)；新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2022009)资助
作者简介：王志强(1982-)，男，博士，副教授，主要从事资源与环境研究. E-mail: 158105219@qq.com
通讯作者：姜文桓(1998-)，女，硕士研究生，主要从事资源与环境研究. E-mail: 906049722@qq.com

仍有以下2个方面还需要完善:一是现有成果集中于单一资源领域和单一产业,碳约束下区域多资源要素、多产业的资源利用系统管理研究亟待加强;二是研究区域集中于全国或经济发达地区,缺少对特殊地区的实证研究成果。因此,本文选取具有资源富集-生态脆弱区域特点的新疆,核算18个产业部门隐含水消耗、隐含能消耗以及隐含碳排放量,从循环率和系统鲁棒性2个方面辨识"水-能-碳"系统耦合属性,从部门动力学剖析"水-能-碳"生态网络协同效应,以期为区域产业间实现协同管理、资源高效利用提供决策依据。

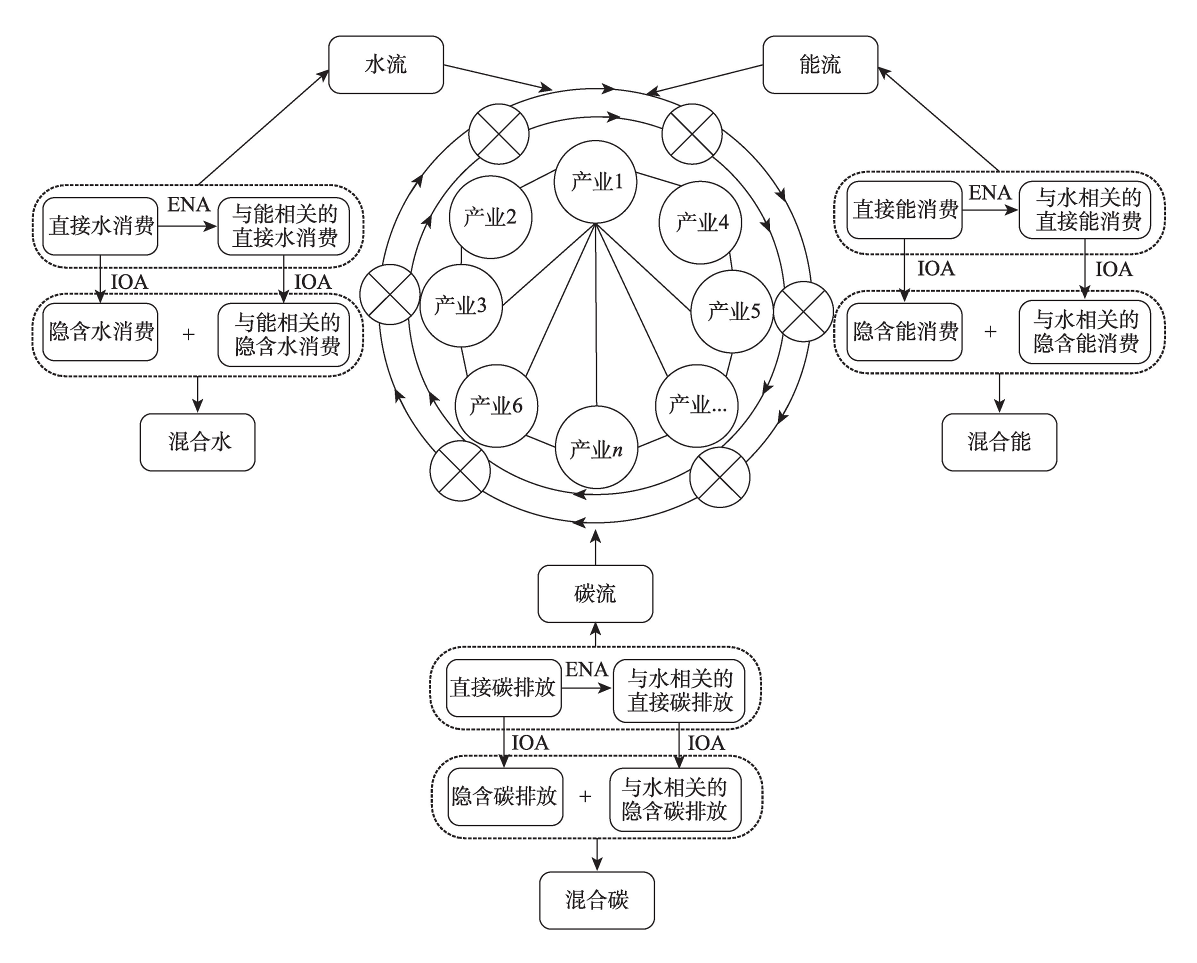
1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆(73°40′~96°18′E,34°25′~48°10′N)位于中国西北边陲,占地面积166.49×10^4 km^2。新疆煤炭、石油、天然气预测量分别为2.19×10^{12} t、101×10^8 t、8.3×10^{12} m^3,是我国重要的能源储备、加工和输出基地[25]。水资源方面,新疆拥有大小河流、冰川分别有570条、18000余条。年均降水量150 mm,水资源总量仅占全国的3%,生产生态用水矛盾日益凸显,呈现典型的生态脆弱区特征。2022年,新疆地区生产总值17741.34×10^{8}元,工业增加值7271.08×10^{8}元,占41%,工业增加值中煤炭开采、石油加工冶炼业等资源型产业占工业增加值的60%以上[26],基本形成了资源型产业主导的产业结构,资源约束日益趋紧,碳锁定效应明显。

1.2 理论模型

为呈现新疆产业间水、能、碳等要素耦合属性及控制依赖关系,构建了"水-能-碳"多要素构成的有机的、多层次、全方位的分析框架体系(图1)。首先,核算产业直接用水、用能、碳排放量,考虑与能相关的水资源(能耗水)、与水相关的能源(水耗能)、与水相关的碳排放(水耗碳)。其次,基于投入产出分析计算隐含水、隐含能、隐含碳,将隐含资源



注:IOA为投入产出分析;ENA为生态网络分析。

图1 "水-能-碳"耦合系统模拟框架

Fig. 1 Simulation framework of the "water-energy-carbon" coupling system

消耗及排放与关联隐含资源消耗及排放相加，形成混合水、混合能、混合碳。最后，运用生态网络分析法，测度循环率、鲁棒性、控制依赖程度定量模拟分析耦合系统关联关系。

1.3 数据来源及处理

本文采用环境投入产出研究法，选取2007、2012年和2017年新疆投入产出表为主要数据源，同时权衡资源数据统计口径，环境投入产出表构建过程中将42个产业部门合并为18个部门（表1）。为消除投入产出表不同年度价格指数影响，产值数据统一用2015年不变价计算。产业直接能源消费量来源于2008、2013年和2018年《新疆统计年鉴》《中国能源统计年鉴》，直接水资源消耗量来源于2007、2012年和2017年《新疆水资源公报》及新疆水利厅调研所得。

表1 新疆产业部门分类情况

Tab. 1 Classification of industrial sectors in Xinjiang

产业部门代码	产业
S1	农业
S2	煤炭开采和洗选业
S3	石油和天然气开采业
S4	金属矿采选业
S5	非金属矿及其他采选业
S6	轻工业
S7	石油、炼焦及核燃料加工业
S8	化学工业
S9	非金属矿物制品业
S10	金属冶炼及制品业
S11	机械设备制造业
S12	高技术制造业
S13	其他工业
S14	电力生产供应业
S15	水的生产和供应业
S16	建筑业
S17	交通运输业
S18	其他服务业

参考张俊等[27]的计算方法，对产业直接消耗水资源、能源量以及碳排放量进行核算。水资源种类包括地表水、地下水以及再生水3种，能源种类包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、电力9种，分别将各产业部门消耗的不同种类水资源、能源、碳排放相加，得到新疆各产业部门水消耗量（W_i，$10^8\,m^3$）、能源消耗量（E_i，10^4 tce）、碳排放量（C_i，10^4 t），计算公式如下：

$$W_i = \sum_{k=1} w_i^k \tag{1}$$

$$E_i = \sum_{p=1} e_i^p \tag{2}$$

$$C_i = \sum_{p=1} c_i^p \tag{3}$$

式中：w_i^k 为第i部门第k种水资源消耗量（$10^8\,m^3$）；e_i^p 为第i部门第p种能源消耗量（10^4 tce）；c_i^p 为第i部门第p种碳排放量（10^4 t）。

由于新疆没有发布水资源的单位耗能量和能源的单位耗水量数据，因此用水单位耗能和用能单位耗水分别采用姜珊[7]、项潇智等[28]的研究成果。各产业部门水、能消耗所产生关联产物，与能相关的用水（W_i^{e-wat}，$10^8\,m^3$）、与水相关的用能（E_i^{w-ene}，10^4 tce）、与水相关的碳排放（C_i^{w-car}，10^4 t），计算公式如下：

$$W_i^{e-wat} = \sum_{p=1} e_i^p \times \bar{w}^p \tag{4}$$

$$E_i^{w-ene} = \sum_{k=1} w_i^k \times \bar{e}^k \tag{5}$$

$$C_i^{w-car} = E_i^{w-ene} \times 0.6671 \tag{6}$$

式中：$\bar{w}^p$ 为第p种能源的用水强度[煤类和油品类用水强度（$m^3 \cdot t^{-1}$）、天然气用水强度（$m^3 \cdot (10^3 m^3)^{-1}$）、电力用水强度（$m^3 \cdot kWh^{-1}$）]；$\bar{e}^k$ 为第k种水资源的用能强度（$kWh \cdot m^{-3}$）。

1.4 研究方法

1.4.1 环境投入产出模型 新疆区域经济体是经济发展内部因素与外部条件共同作用而产生的区域发展实体，各产业部门总产出受中间使用、最终使用与流入3部分的影响。中间需求部门受总产出影响，最终需求部门受需求消费推动[27]。参考张俊等[27]、彭焜等[29]、孙才志等[30]模型构建方法，采用环境投入产出模型对隐含水、隐含能和隐含碳进行计算。以水资源计算为例，具体过程如下：

（1）各产业部门直接水资源消耗系数[w_i^d，$10^8\,m^3 \cdot (10^4元)^{-1}$]的计算公式如下：

$$w_i^d = W_i / X_i \tag{7}$$

式中：X_i 为部门i的经济产出（10^4元）。

（2）中间部门隐含水矩阵（W^e）计算公式如下：

$$W^e = W^d \times (I - A)^{-1} \times X_i^{diag} \tag{8}$$

$$a_{ij} = z_{ij} / X_i \tag{9}$$

式中：W^d 为直接水资源消耗系数组成的直接水消耗系数矩阵；I为单位矩阵；$A = (a_{ij})$，为直接消耗系数

矩阵；a_{ij} 为部门j生产单位产品对部门i的直接消耗量；z_{ij} 为部门j到i产品的直接消耗（10^4元）；X_i^{diag} 为X_i 的对角矩阵。

（3）终端部门隐含水矩阵（W^z）计算公式为：

$$W^z = W^d \times (I - A)^{-1} \times L^{diag} \tag{10}$$

式中：L^{diag} 为终端部门对i部门的价值型需求对角矩阵。

（4）混合水矩阵（W^h）计算公式如下：

$$W^h = W^e + W^{e'} \tag{11}$$

式中：$W^{e'}$ 为与能相关的隐含水矩阵。

能源和碳排放计算原理与水资源相同，只需将相关系数替换即可。

1.4.2 生态网络分析模型 生态网络分析法运用矩阵运算原理对生态系统中的能量流动规律进行模拟。参考张俊等[27]的计算方法，基于环境投入产出模型计算出的隐含水、隐含能、隐含碳，构建生态网络分析模型，通过芬恩循环指数（FCI）、系统鲁棒性指数（SR）呈现产业部门间要素的循环率和可持续性，通过控制指数（CA）和依赖指数（DA）表征部门动力学。

为方便后续计算，对构建关联网络和单一网络进行说明。当网络系统中包含能耗水时，即为水关联网络；当网络系统不包含能耗水时，即为水网络。以水关联网络计算为例，具体计算过程如下：

（1）FCI表示水关联网络中水流的循环率，数值越大说明水的有效利用效率越高，计算公式如下：

$$N = (n_{ij}) = (I - G)^{-1} \tag{12}$$

$$g_{ij} = f_{ij} / T_i^{repc} \tag{13}$$

$$T_i = \sum_{j=1}^{n} f_{ij} + y_i \tag{14}$$

$$FCI_i = \left(\frac{n_{ii} - 1}{n_{ii}} T_i \right) / TST \tag{15}$$

式中：N为代谢水流的积分无量纲流矩阵；n_{ij} 为混合水从部门i出发经过一次或多次循环后再次流入部门j的循环量；$G = (g_{ij})$，为代谢水流的直接无量纲矩阵；g_{ij} 为部门i到j的混合水流通强度；f_{ij}为中间部门消费的从部门i到j流通的混合水（10^8 m^3）；T_i^{repc} 为T_i 按列重复n次形成的n维方阵；T_i 为i部门流通的混合水（10^8 m^3）；y_i 为终端部门消费的来自i部门的混合水（10^8 m^3）；FCI_i 为i部门的混合水流循环强度；TST为水关联网络中间部门和终端部门混合水流通量（10^8 m^3）。

（2）SR通过考虑流动效率和冗余之间的平衡来表示耦合网络的可持续发展能力，计算公式如下：

$$C = -TST_b^2 \sum_{i=1,j=1}^{n} \frac{f_{ij}}{TST_b} \lg \frac{f_{ij}}{TST_b} \tag{16}$$

$$A_e = TST_b^2 \sum_{i=1,j=1}^{n} \frac{f_{ij}}{TST_b} \lg \frac{f_{ij} TST_b}{T'_i T_j} \tag{17}$$

$$TST_b = \sum_{i=1,j=1}^{n} f_{ij} \tag{18}$$

$$T'_i = \sum_{j=1}^{n} f_{ij}, \quad T_j = \sum_{i=1}^{n} f_{ij} \tag{19}$$

$$\alpha = A_e / C \tag{20}$$

$$SR = -\alpha \lg(\alpha) \tag{21}$$

式中：C为水关联网络的发展能力（10^{16} m^6）；TST_b 为水关联网络中间部门混合水流通量之和（10^8 m^3）；A_e为水关联网络的上升性（10^{16} m^6）；T'_i 为中间部门使用i部门混合水的总输入或总输出（10^8 m^3）；T_j 为中间部门使用j部门混合水的总输入或总输出（10^8 m^3）；α 为系统上升性占系统发展能力的比值；SR为系统鲁棒性指数。

（3）控制指数（CA）和依赖指数（DA）通过计算部门i对j的控制程度和部门j对i的依赖程度，量化展现经济部门间的资源流动。计算公式如下：

$$g'_{ij} = f_{ij} / T_i^{repr} \tag{22}$$

$$N' = (n'_{ji}) = (I - G')^{-1} \tag{23}$$

$$CA = \left(ca_{ij}\right) = \begin{cases} n_{ij} - n'_{ji} > 0, & ca_{ij} = \dfrac{n_{ij} - n'_{ji}}{\sum_{i=1}^{n} n_{ij} - n'_{ji}} \\ n_{ij} - n'_{ji} \leqslant 0, & ca_{ij} = 0 \end{cases} \tag{24}$$

$$DA = \left(da_{ij}\right) = \begin{cases} n_{ij} - n'_{ji} > 0, & da_{ij} = \dfrac{n_{ij} - n'_{ji}}{\sum_{i=1}^{n} n_{ij} - n'_{ji}} \\ n_{ij} - n'_{ji} \leqslant 0, & da_{ij} = 0 \end{cases} \tag{25}$$

式中：g'_{ij} 为部门j到i的混合水流通强度；T_i^{repr} 为将T_i转置后按行重复n次形成的n维方阵；N' 为面向产出的代谢水流矩阵；n'_{ji} 为混合水从部门j出发经过一次或多次循环后再次流入i部门的循环量；$G' = (g'_{ij})$，为代谢水流的间接无量纲矩阵；ca_{ij} 为部门i对j的控制系数；da_{ij} 为部门j对i的依赖系数。

水网络、能关联网络、能网络、碳关联网络以及

碳网络的计算原理与水关联网络相同，只需将相关系数替换即可。

2 结果与分析

2.1 基于环境投入产出模型的终端消费

2007、2012、2017年新疆最终使用部门消费混合水分别为619.76×10^8 m^3、849.18×10^8 m^3、953.39×10^8 m^3，消费增长率为53.90%（图2）。2007—2017年，农业（S1）是混合水最大消耗部门，国内省外流出和居民消费的混合水消费比重最高，占最终使用总混合水量的85%。

2017年新疆终端消费混合能52941.68×10^4 tce，较2007年上涨297.10%（图3）。2017年资本形成总额混合能消费占最终使用总混合能消费的42.24%，省外流出占40.34%，居民消费占11.58%。从各产业部门分布来看，化学工业（S8）和非金属矿物制品业（S9）是拉动资本形成总额的主要部门，石油和天然气开采业（S3）和金属冶炼及制品业（S10）是能源主要流出部门。

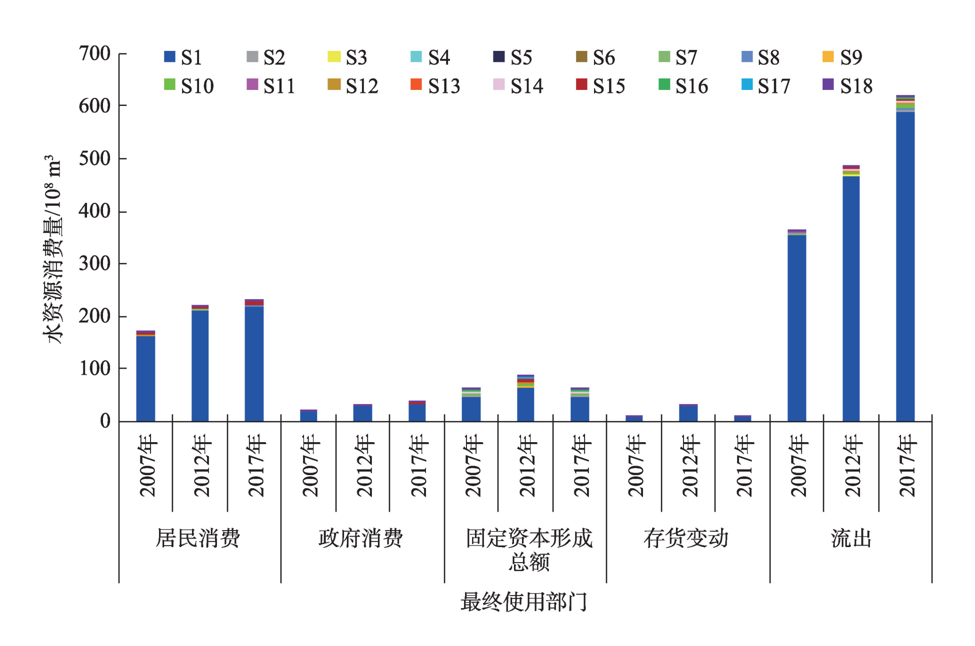


图2　新疆终端部门混合水消费

Fig. 2　Mixed water consumption in end sectors of Xinjiang

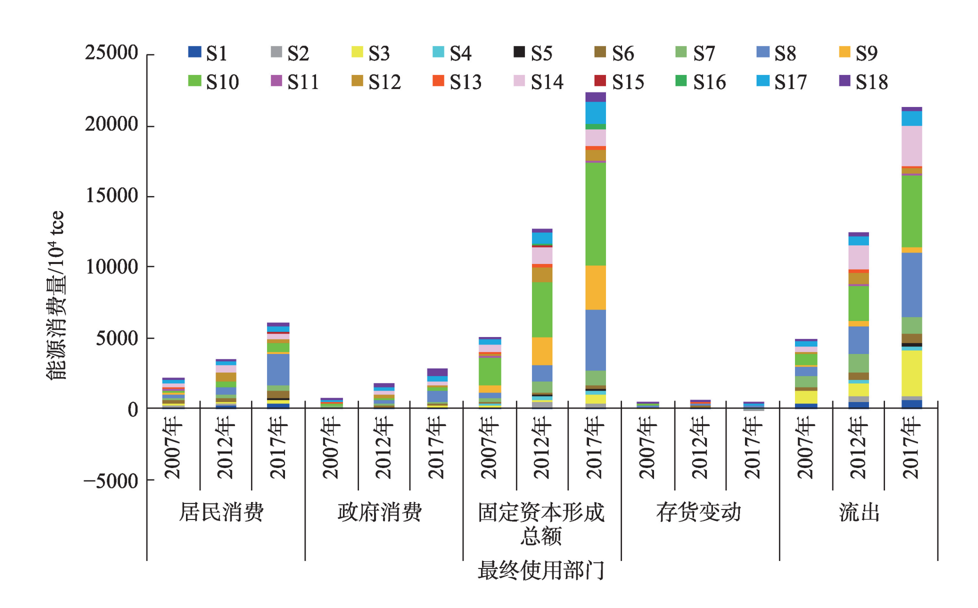


图3　新疆终端部门混合能消耗

Fig. 3　Mixed energy consumption in end sectors of Xinjiang

2007、2012、2017年混合碳排放量分别为50650.62×10^4 t、79898.71×10^4 t、112150.72×10^4 t,整体呈现上涨趋势(图4)。从各产业部门碳排放结构分布来看,金属冶炼及制品业(S10)和电力生产供应业(S14)是混合碳排放主要部门,占最终使用总排放量的40%。

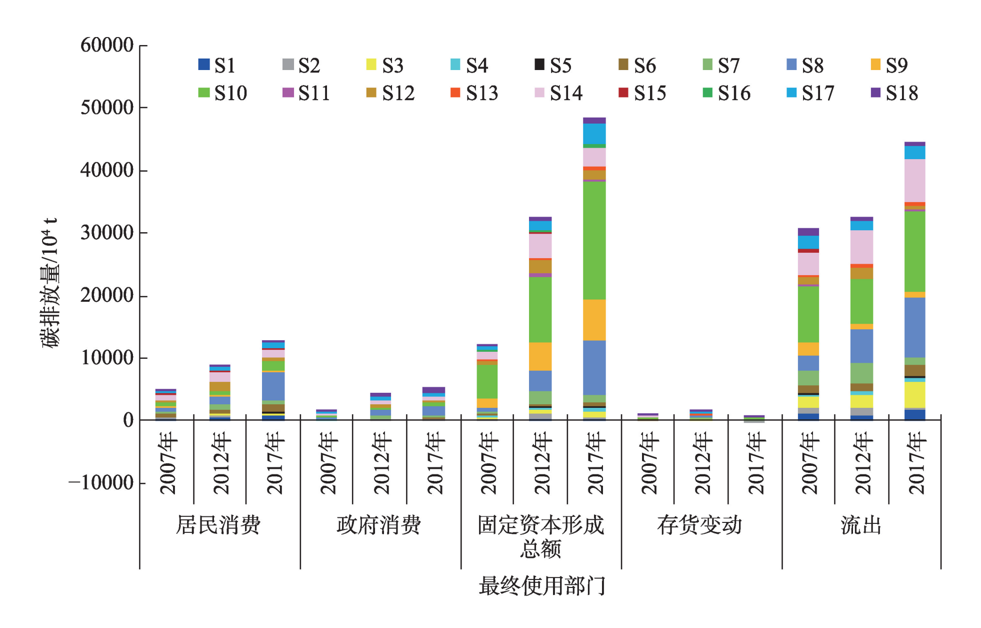


图4 新疆终端部门混合碳排放

Fig. 4 Mixed carbon emissions in end sectors of Xinjiang

2.2 基于生态网络模型的"水-能-碳"系统耦合特征

2.2.1 系统循环率 芬恩循环指数表征的是网络中循环流动的强度,量化水-能-碳耦合对网络循环的影响。对水、能、碳的关联网络和单一网络进行对比分析,呈现新疆产业间水-能-碳耦合网络资源循环流动特征(图5)。通过计算,2017年水网络总循环率为38.98%,水关联网络总循环率为38.44%,与能相关的水流动降低了混合水的流动速率。水网络中农业(S1)用水占总混合水量的93.66%,但循环率仅为36.82%,表明农业(S1)水循环率降低了整个系统的循环率。能网络和能关联网络的芬恩循环指数分别为21.23%和21.31%,能关联网络中金属冶炼及制品业(S10)和化学工业(S8)混合能消耗占比49.49%,但部门循环贡献率仅为11.13%,表明能源主要消耗部门间产业关联不强,引致能源循环率下降。碳排放关联网络循环率为21.66%,碳关联网络比碳网络循环率高0.19个百分点,碳关联网络中金属冶炼及制品业(S10)和化学工业(S8)产生49.54%的混合碳,循环贡献率仅为12.25%。

总体而言,2007—2017年水类网络(水关联网络与水网络统称)、能类网络(能关联网络与能网络统称)、碳类网络(碳关联网络与碳网络统称)系统循环率均呈现下降趋势,究其原因是受产业结构升级转型的影响,中低技术制造业(S7、S8、S9、S10)尚未能与其他产业部门形成大范围的相互联系,引致水流、能流、碳流无法高效、快速地返回关联系统。18个产业部门水类网络循环率最高是农业(S1),能类网络循环率主要贡献部门由石油和天然气开采业(S3)、石油、炼焦及核燃料加工业(S7)转变为金属冶炼及制品业(S10)和化学工业(S8),碳类网络循环率最高是金属冶炼及制品业(S10)。

2.2.2 系统鲁棒性 生态网络系统的循环效率并非越高越好,当面对干扰时系统还需具备稳定运行的储备力量,系统鲁棒性指数(SR)通过平衡流动效率和冗余呈现耦合网络的可持续性。当系统上升性与发展能力的比值(α)越趋近于1,说明系统具有更高的效率;α越趋近于0,说明系统具有更强的弹性。通过计算,当α=0.3679、SR=0.3679时,是SR曲线的平衡点,表明系统具有良好的可持续发展能力;当点位于曲线左边,说明系统效率低、刚性强,整体处于停滞状态;当点位于曲线右边,说明系统韧性弱,难以抗拒外部风险。

通过新疆生态网络SR曲线可知(图6),水类网络2007、2012年和2017年SR均值分别为0.077、

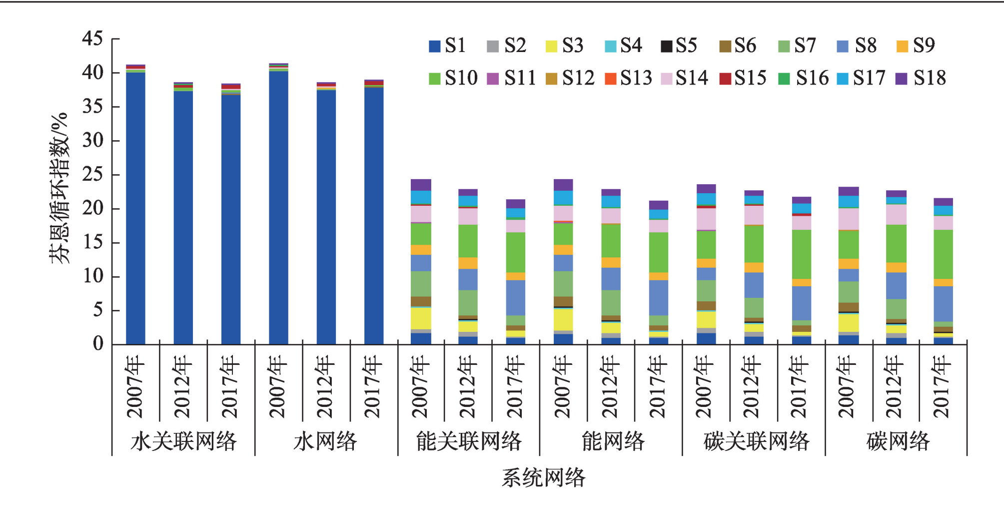
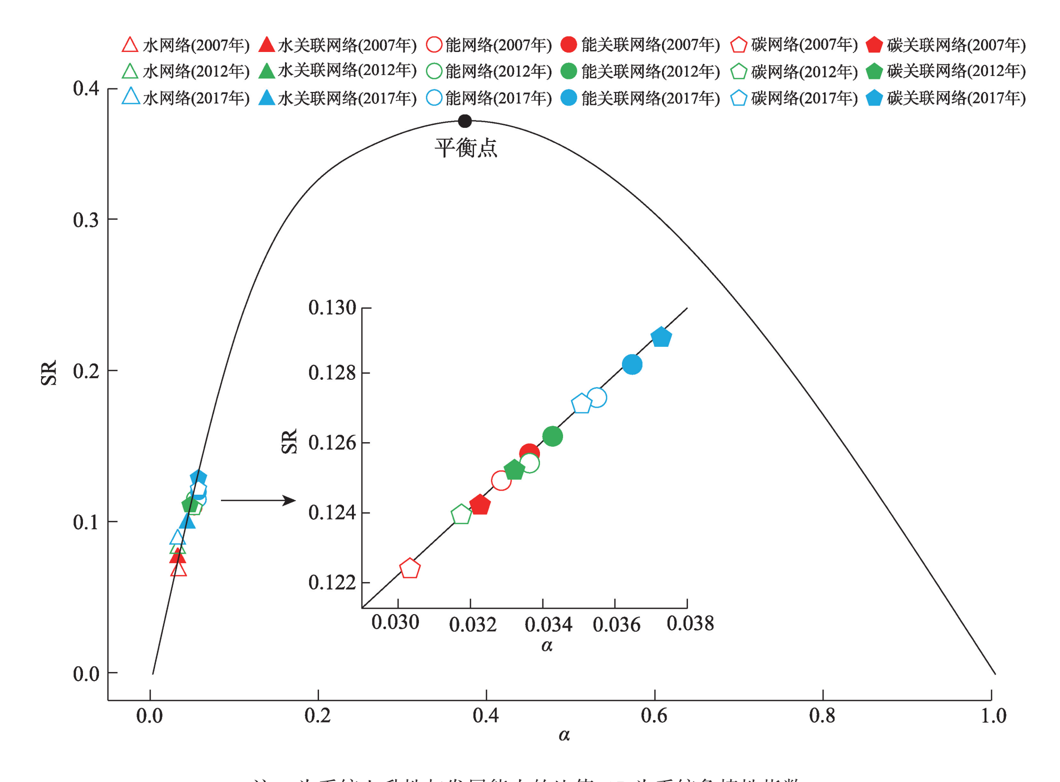


图5　新疆产业"水-能-碳"系统循环率

Fig. 5　Recycling rate of "water-energy-carbon" system in industry of Xinjiang



注：α为系统上升性与发展能力的比值；SR为系统鲁棒性指数。

图6　新疆生态网络系统鲁棒性指数(SR)曲线

Fig. 6　SR curve of ecological network of Xinjiang

0.083、0.096，处于曲线左侧，鲁棒性虽逐年升高，但均值始终未能突破0.1，区域用水效率低，导致系统向可持续发展转变进程缓慢。能类网络与碳类网络的SR均值整体位于0.124~0.128区间内，处于曲线左侧，鲁棒性虽然呈上升趋势，但系统可持续发展能力未有实质性的突破，整体呈现不可持续发展的状态。为提升"水-能-碳"系统可持续发展能力，需提高耦合系统资源使用效率，优化资源流动路径，增强系统内部可持续发展能力。

2.2.3　系统控制依赖变化　"水-能-碳"耦合通过影响系统内部关系从而使部门间控制依赖关系发生改变，利用控制指数和依赖指数通过网络方式分别从投入和消费2个角度展示"水-能-碳"耦合对部门间关联程度的影响。

控制变化方面，2017年水系统(图7g)中非金属矿物制品业(S9)对建筑业(S16)的控制变化率为

28.54%，金属矿采选业(S4)对金属冶炼及制品业(S10)控制变化率为12.46%，其他产业部门控制变化率均处于10%以下。能系统(图7h)金属矿采选业(S4)对金属冶炼及制品业(S10)、农业(S1)对轻工业(S6)控制变化率分别为13.14%、9.66%，绝大多数产业对建筑业(S16)的控制关系变强，究其原因是部门间存在"供-需"关系的影响，因此控制变化率较为突出。由于碳作为能源消费的产物，在基础工业为产业提供能源、保障生产材料以及运输转移的同时，碳排放也随着能源消费进行流动，因此碳系统(图7i)部门间控制关系变化与能网络相似。"水-能-碳"系统控制变化率表明新疆产业结构单一，产业间关联度低，不利于水、能利用效率的提升和碳减排。

依赖变化方面，2017年水系统(图8g)中建筑业(S16)对非金属矿物制品业(S9)依赖指数为9.54%，金属冶炼及制品业(S10)对金属采选业(S4)依赖率为9.51%，其他产业间依赖变化率处于9%以下。能系统(图8h)中石油、炼焦及核燃料加工业(S7)对石油和天然气开采业(S3)、金属冶炼及制品业(S10)对金属矿采选业(S4)的依赖率分别为8.28%、10.05%。碳系统(图8i)中建筑业(S16)对非金属矿物制品业(S9)、金属冶炼及制品业(S10)对金属矿采选业(S4)的依赖指数分别为9.54%、9.77%，"水-能-碳"依赖指数表明新疆产业间要素依赖关系弱，产业间高度依赖关系尚未形成，降低了生产要素的

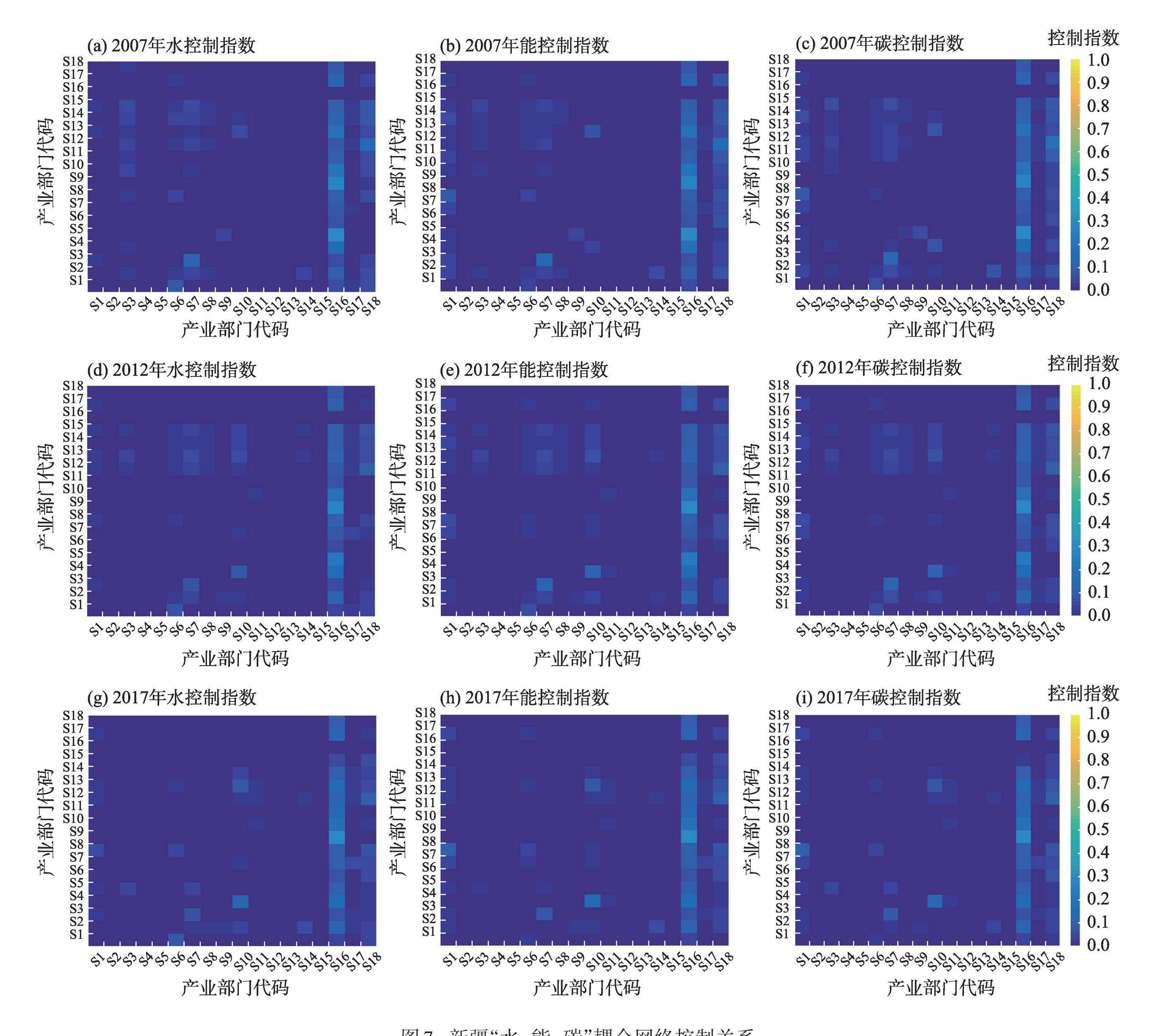


图7 新疆"水-能-碳"耦合网络控制关系

Fig. 7 Control relationship of "water-energy-carbon" coupling network in Xinjiang

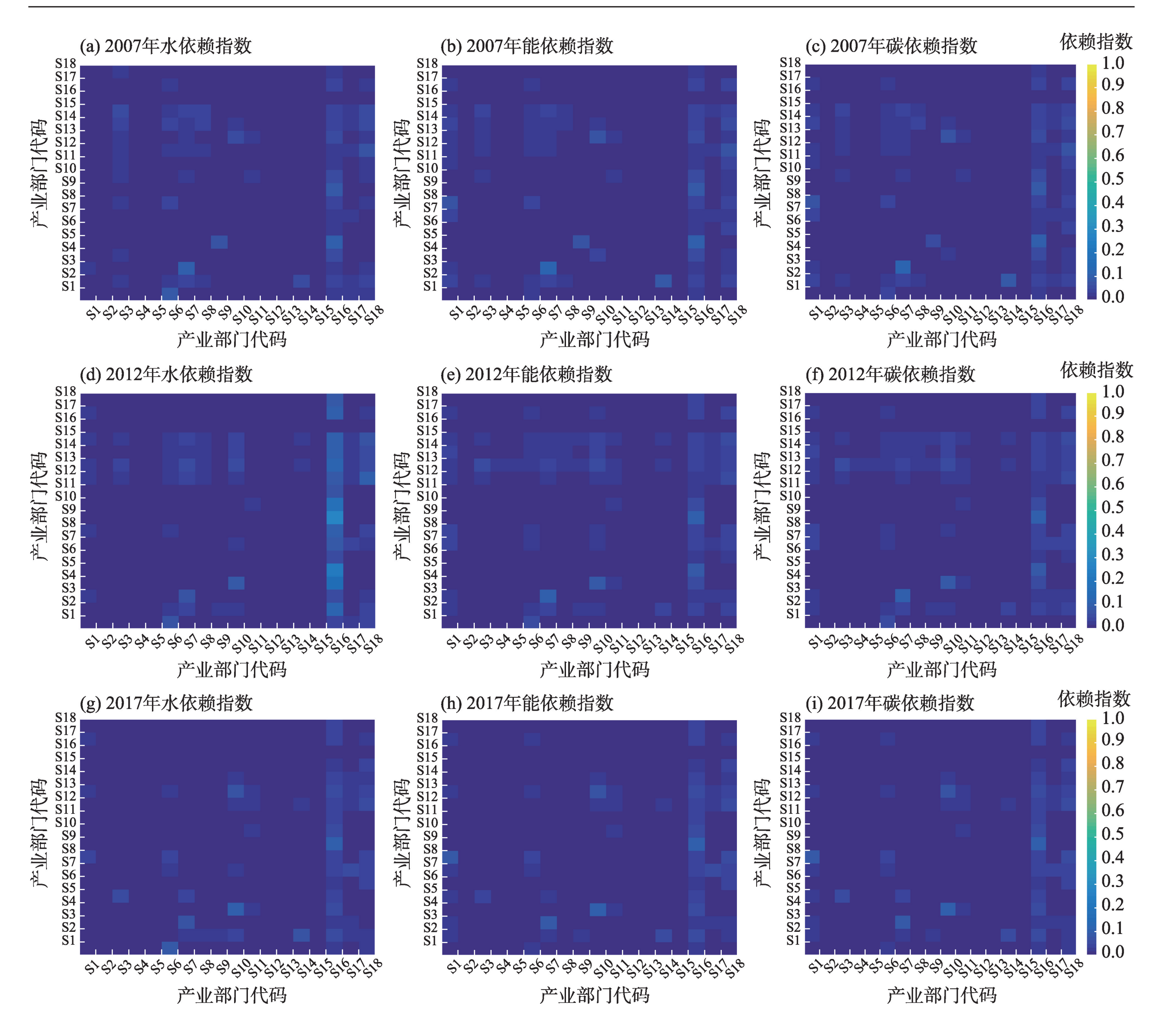


图8　新疆“水-能-碳”耦合网络依赖关系

Fig. 8　Dependency relationship of “water-energy-carbon” coupling network in Xinjiang

循环利用。

综合而言，2007—2017年，绝大多数产业部门水网络、能网络、碳网络控制区间位于0~0.2内，依赖区间位于0~0.1内，表明新疆“水-能-碳”耦合系统各部门间的水网络、能网络、碳网络关联性不强，控制与依赖关系尚处于偶发状态，产业间“水-能-碳”资源利用管理未能形成协同效应。

3　讨 论

“水-能-碳”是一个复合、动态演变的系统且具有强烈的区域底色，受制于资源禀赋、经济发展阶段和产业发展水平的影响，不同的资源投入组合格局和开发利用强度、资源流动和代谢效率，影响着区域“自然-经济”系统利用效率和碳减排效率[4]。

与现有研究相比，本文研究对象从两要素的耦合分析[6-15]扩展到了“水-能-碳”三要素的研究，研究区域从经济发达地区[18-20]向能源富集-生态脆弱区域扩展，实现了研究对象和研究区域的进一步突破。将新疆研究结果与其他省份对比，系统循环率方面，福建省[27]、湖北省[29]水类网络的芬恩循环指数高于能类网络，和本文的研究结果相同，主要是湖北、福建、新疆农业用水占总用水量比例较高，同时自身分配系数较高，减少了水资源流动的路径选择，致使水在各部门间的流动快于能源。系统鲁棒性方面，安徽省[23]和湖北省[29]的生态网络最接近于平衡点，福建省[27]次之，新疆生态网络处于发展停

滞状态，究其原因是新疆水资源主要用于农业，能源主要用于金属冶炼及制品业和化学工业，产业结构单一，不利于系统整体的可持续发展。系统控制依赖变化方面，新疆部门间控制、依赖程度与其他省份[23,27,29]相比，尚处于偶发状态，未能形成协同效应，这是因为产业间尚未建立紧密的联系，无法形成高效的水资源、能源利用。

事实上，新疆对于水资源、能源以及碳排放的管理，长期处于分治状态，产业间"水-能-碳"耦合系统资源消耗及排放量大、产业结构单一；系统循环率降低，发展趋于停滞；系统耦合协调性面临失调的风险。因此，从多要素耦合角度出发，协同管理"水-能-碳"耦合系统，明晰消耗污染主要源头，统筹兼顾资源关联影响，优化要素流动路径，实现技术资源有效衔接，建立供需双向反馈，推动要素协同发展，有助于实现区域资源高效利用和碳减排，实现正面效应的叠加，减少负面效应的拮抗。

4 结 论

（1）2007—2017年，新疆产业混合水、混合能、混合碳排放整体呈现上升趋势，混合水主要用于流出和居民消费，混合能和混合碳主要用于流出和资本形成总额。农业是混合水的主要消费部门，金属冶炼及制品业和化学工业是混合能的主要消耗部门和混合碳的主要排放部门。

（2）2007—2017年水关联网络循环率从41.25%降低至38.46%；能源关联网络循环率从24.34%下降至21.31%；碳排放关联网络循环率从23.56%下降至21.66%，产业间"水-能-碳"耦合系统整体处于下降的状态。

（3）水关联网络鲁棒性一直处于0.1以下；能关联网络、碳关联网络鲁棒性在0.124~0.128区间浮动，产业间"水-能-碳"耦合系统处于不可持续发展状态。

（4）新疆产业部门间水系统、能系统、碳系统关联性不强，控制与依赖关系尚处于偶发状态，未形成协同效应。

参考文献（References）

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[N]. 人民日报, 2022-10-17(001). [Xi Jinping. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: Report at the 20th National Congress of the Communist Party of China[N]. People's Daily, 2022-10-17(001).]

[2] Khan Z, Linares P, García-Gonzúlez J. Integrating water and energy models for policy driven applications: A review of contemporary work and recommendations for future developments[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 1123-1138.

[3] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800-813. [Hong Siyang, Wang Hongrui, Lai Wenli, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 800-813.]

[4] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域"水-土-能-碳"耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628. [Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1613-1628.]

[5] 李思佳, 杨谨, 方丹, 等. 基于产业链视角的京津冀区域碳排放影响因素研究[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3473-3487. [Yang Sijia, Yang Jin, Fang Dan, et al. The infiuencing factors of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from the perspective of industrial chain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3473-3487.]

[6] 曾萌, 张园园, 王红瑞, 等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2021, 32(10): 12-16. [Zeng Meng, Zhang Yuanyuan, Wang Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China[J]. Water Resources Protection, 2021, 32(10): 12-16.]

[7] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017. [Jiang Shan. Scientific concept of water-energy nexus and coupling simulation[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Science, 2017.]

[8] Wang J X, Rothausen S G S A, Conway D, et al. China's water-energy nexus: Greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(1): 268-272.

[9] 陈燕玲, 王投婧, 占明锦, 等. 2000—2019年江西省能源消费碳排放变化及其影响因素[J]. 气象与减灾研究, 2022, 45(1): 38-45. [Chen Yanling, Wang Toujing, Zhan Mingjin, et al. Study on carbon emission intensity and its influence factor for the energy consumption in Jiangxi Province during 2000—2019[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2022, 45(1): 38-45.]

[10] 龙志, 孙颖琦, 郎丽霞, 等. 黄土高原典型县域碳排放特征与时空格局——以庆城县为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1631-1641. [Long Zhi, Sun Yingqi, Lang Lixia, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of carbon emissions in the Loess Plateau:

A case study of Qingcheng County[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1631-1641.]

[11] 吴茜, 陈强强. 甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 274-283. [Wu Xi, Chen Qiangqiang. Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 274-283.]

[12] 刘岱淞. 上海市居民生活用能碳排放的因素分解研究[J]. 上海经济, 2021(2): 56-73. [Liu Daisong. Study on factor decomposition of carbon emissions from household energy use in Shanghai [J]. Shanghai Economy, 2021(2): 56-73.]

[13] 杨顺顺. 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究[J]. 中国工业经济, 2015(6): 55-67. [Yang Shunshun. Evaluation and forecasting of carbon emissions transfer from the industrial sector in China[J]. China Industrial Economics, 2015(6): 55-67.]

[14] 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣. 陆地水-碳耦合模拟研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3187-3196. [Liu Ning, Sun Pengsen, Liu Shirong. Research advances in simulating land water-carbon coupling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3187-3196.]

[15] 王川, 刘永昌, 李稚. 塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇空间格局的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 729-738. [Wang Chuan, Liu Yongchang, Li Zhi. Effects of ecological water conveyance on the spatial pattern of vegetation carbon sources/sinks in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 729-738.]

[16] Venkatesh G, Chan A, Brattebø H. Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: Comparison of four city case studies and the relevant influencing factors[J]. Energy, 2014, 75: 153-166.

[17] Zhang Y C, Shen Y J, Xu X L, et al. Characteristics of the water-energy-carbon fluxes of irrigated pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd) orchards in the North China Plain[J]. Agriculture Water Management, 2013, 128: 140-148.

[18] 余娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于"水-能-碳"关联的城市污水处理系统碳排放研究[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1052-1062. [Yu Jiao, Zhao Rongqin, Xiao Liangang, et al. Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the "water-energy-carbon" nexus[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1052-1062.]

[19] 余锦如, 王远, 余凡, 等. 基于"水-能-碳"消费视角的福建省资源环境与经济增长脱钩关系[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3845-3855. [Yu Jinru, Wang Yuan, Yu Fan, et al. Decoupling between resources and environment and economic growth in Fujian Province, China from the perspective of "water-energy-carbon" consumption[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3845-3855.]

[20] 杨雪莼. 基于不同视角的城市产业能源-水-碳耦合分析框架及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2019. [Yang Xuechun. Research on urban sectoral energy-water-carbon nexus analysis framework and application based on different perspective: Case studies for Beijing and Shanghai[D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.]

[21] Venkatesh G, Chan A, Brattebø H. Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: Comparison off our city case studies and the relevant influencing factors[J]. Energy, 2014, 75: 153-66.

[22] Zhou Y C, Zhang B, Wang H K, et al. Drops of energy: Conserving urban water to reduce greenhouse gas emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47: 10753-10761.

[23] 黄钰. 安徽省水-能耦合关系与作用机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2019. [Huang Yu. Water-energy nexus relationship and action mechanism in Anhui Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.]

[24] Feng K, Chapagain A, Suh S, et al. Comparison of bottom-up and top-down approaches to calculating the water footprints of nations [J]. Economic Systems Research, 2016, 23(4): 371-385.

[25] 贺佑国, 李德波, 叶旭东. 我国中长期煤炭供应分析[J]. 能源政策研究, 2008(2): 2-6. [He Youguo, Li Debo, Ye Xudong. Analysis of coal providing for medium & long-term in China[J]. Energy Policy Research, 2008(2): 2-6.]

[26] 新疆统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 37-42. [Xinjiang Bureau of Statistics. Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 37-42.]

[27] 张俊, 林卿, 王江泉. 省域经济系统能源与水关联及协同发展研究基于投入产出和生态网络分析的福建省实证[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2020, 33(6): 80-92. [Zhang Jun, Lin Qing, Wang Jiangquan. Energy and water nexus and collaborative development in provincial economic system: Empirical study in Fujian based on input-output and ecological network analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2020, 33(6): 80-92.]

[28] 项潇智, 贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 114-123. [Xiang Xiaozhi, Jia Shaofeng. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 114-123.]

[29] 彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 等. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1514-1528. [Peng Kun, Zhu He, Wang Saige, et al. Energy-water nexus in Hubei Province based on system input-output analysis and ecological network analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1514-1528.]

[30] 孙才志, 靳春玉, 阎晓东. 基于MRIO和ENA的中国省区能源-水资源耦合关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 32-40. [Sun Caizhi, Jin Chunyu, Yan Xiaodong. Chinese provincial energy-water nexus relationship based on MRIO and ENA[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(3): 32-40.]

Characteristics of "water-energy-carbon" coupling system in Xinjiang based on the ecological network analysis

WANG Zhiqiang, JIANG Wenhuan, LU Shiyue

(College of Public Administration, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Water, energy, and carbon exert significant influence on the intricate interconnected systems of economy, society, and ecology. Alterations in any one of these factors can instigate a cascading effect, transferring ecological pressures and impacting the sustainable development of both regions and industries. Focusing on Xinjiang, China, and utilizing input and output data from 2007, 2012, and 2017, this paper employed the environmental input-output model to calculate implicit water consumption, implicit energy consumption, and implicit carbon emissions across 18 industrial sectors in Xinjiang. Additionally, an ecological network analysis model was employed to elucidate system circulation rates, robustness, and control dependencies. The findings revealed the following insights: (1) Mixed water was predominantly allocated to domestic outflow and household consumption, whereas mixed energy and mixed carbon were primarily utilized for domestic outflow and total capital formation. (2) The circulatory rates of water networks remained below 42%, while those of energy networks and carbon networks were below 25%, indicating an overall declining trend in the network system. (3) The system robustness of water networks, energy networks, and carbon networks signified a development stagnation, portraying an unsustainable overall developmental state. (4) A weak correlation was observed among the water system, energy system, and carbon system in various departments within the "water-energy-carbon" coupling system in Xinjiang. Control and dependence relationships are currently in an incidental state, lacking the formation of a synergistic "water-energy-carbon" relationship between industries. This study elucidated the governing principles of the "water-energy-carbon" coupling system in Xinjiang, providing valuable data to support the realization of a low-carbon and efficiently integrated resource management model.

Key words: ecological network analysis; environmental input-output; "water-energy-carbon" coupling; Xinjiang